

Langsamer fahrende Güterzüge für weniger Lärmemission?

Michael Mönsters, Jakob Geischberger, Arthur Schady und Katharina Elsen

Bestimmte Wetterlagen haben einen signifikanten lärmverstärkenden Einfluss auf die Schallausbreitung entlang von Verkehrswegen wie Bahnstrecken, Straßen und Autobahnen. Um dem entgegenzuwirken, kann die Geschwindigkeit abschnittsweise gesenkt werden. Bei Bahnstrecken ändert sich dadurch jedoch die Transportkapazität der Strecke. Der Beitrag gibt einen Überblick über die Zusammenhänge von Wetter und Lärmbelastung sowie die Auswirkungen der Geschwindigkeitsreduktion auf Streckenkapazität und Betriebsqualität.

1 Einleitung und Ziel der Untersuchung

Neben anderen Faktoren beeinflusst das Wetter, wie stark die Anwohner durch Verkehrslärm beeinträchtigt werden. Diese Tatsache kennen alle Anwohner im erweiterten Umfeld von Bahnlinien, aber auch von Autobahnen und anderen Lärmquellen. Während eine Lärmquelle an manchen Tagen kaum wahrzunehmen ist, kann sie an anderen Tagen deutlich störend hörbar sein. Diese Wahrnehmung hängt nicht nur mit psychologischen Ursachen und mit dem Niveau der sonstigen Umgebungsgeräusche zusammen, sondern wird auch ganz maßgeblich von Wind, Windrichtung und der Temperaturschichtung bestimmt.

Der Wettereffekt auf die Schallausbreitung ist bekannt und kann durch Messungen und mit Berechnungsmodellen nachgewiesen werden. So zeigen zum Beispiel einfache Simulationen von einer linienhaften Quelle (Bahnstrecke oder Autobahn) in einem realen Umfeld mit Bebauung und Topografie, wie sie in Abb. 1 dargestellt sind, dass je nach Wetterlage bestimmte Bereiche in einem Gebiet stark „beschallt“ werden, während sie unter anderen Umständen kaum betroffen sind. In Abb. 1 wird gezeigt, dass der Lärmpegel an den Häusern in größeren Entfernungen um bis zu +30 dB ansteigen und bis zu -20 dB niedriger ausfallen kann, verglichen zu Normalbedingungen ohne Wettereinfluss.

Es existieren zahlreiche Projekte zum Thema Schienenlärm, die eine Senkung des Lärmpegels zum Ziel haben. Bisher wenig betrachtet wurde der Einfluss klein-klimatischer Bedingungen auf die lokale Schallausbreitung. Hier ist insbesondere der in Abb. 1 gezeigte Einfluss der Wetterverhältnisse von Bedeutung.

Es gilt zu untersuchen, inwiefern auch bei günstigen Schallausbreitungsbedingungen die Belastung am Immissionsort auf das Normalmaß beschränkt werden kann, al-

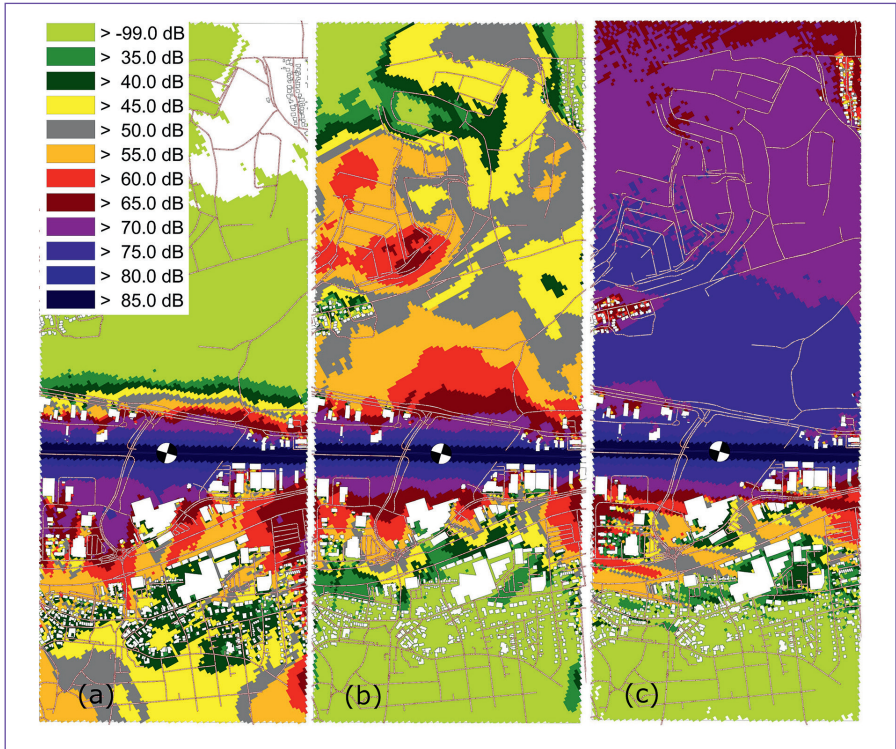


Abb. 1: Gegenüberstellung von drei Wettersituationen im Modellvergleich: (a) links: Wind aus Nord an einem heißen Sommertag; (b) Mitte: Normalbedingungen, fast Windstille bei bewölktem Himmel; (c) rechts: Wind aus Süd in einer kalten Winternacht

so einen Lärmpegel, der dem bei durchschnittlichen Wetterbedingungen entspricht. Dabei fällt Güterzügen eine besondere Bedeutung zu, da diese im Vergleich zu anderen Zügen eine höhere Lärmemission aufweisen [1].

Eine Möglichkeit, dem erhöhten Schallpegel bei günstigen Ausbreitungsbedingungen entgegenzuwirken, stellt die Geschwindigkeitsreduktion von Güterzügen im betreffenden Zeitraum und Streckenabschnitt dar. Je langsamer Züge fahren, umso geringer ist deren Lärmemission [2, 3]. Aus diesem Grund werden in dieser Untersuchung sämtliche Güterzüge, welche einen lärmbegünstigenden Streckenabschnitt passieren, ihre Höchstgeschwindigkeit für einen definierten Zeitraum über eine festgelegte Distanz reduzieren. So könnte der lärmverstärkende Effekt der lokalen Wetterverhältnisse kompensiert bzw. vermindert werden. Neben der erwarteten Lärminderung soll zudem aufgezeigt werden, wie stark die Auswirkungen auf Be-

triebsqualität und Kapazität des entsprechenden Streckenabschnittes ausfallen, da die Beschränkung der Güterzughöchstgeschwindigkeit einen erheblichen Eingriff in den Bahnbetrieb darstellt [4].

Die Untersuchung findet im Rahmen des Projektes Urbane Mobilität am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) in einem interdisziplinären Team aus Eisenbahnbetriebswissenschaftlern und Verkehrsmeteorologen statt.

Zentrales Anliegen ist eine Aussage hinsichtlich des Trade-Offs, der zwischen einem geringeren Lärmpegel einerseits und der Sicherstellung ausreichender Streckenkapazität und Betriebsqualität andererseits entsteht. Ziel ist es, diese Abwägung quantitativ zu ergänzen, indem Simulationen von verschiedenen meteorologischen sowie bahnbetrieblichen Szenarien durchgeführt werden.

2 Aktuelle Ansätze in Forschung und Technik

In diesem Kapitel sollen die aktuellen Ansätze zu den Themen Schienenlärmminderung sowie wetterbedingte Schallausbreitung anhand einer Auswahl bisheriger Projekte und Studien aufgezeigt werden.

Das Thema Schienenlärm hat in Deutschland eine weiterhin hohe Bedeutung, sowohl im Eisenbahnsektor selbst als auch in der Bevölkerung. Politik und Bahn haben in den letzten Jahren zahlreiche Maßnahmen zur Minderung des Bahnlärms auf den Weg gebracht und umgesetzt. Bei der Lärmminderung kann zwischen einer Reduktion an der Quelle und einer Reduktion entlang des Ausbreitungswegs unterschieden werden.

Zu den Maßnahmen am Ausbreitungsweg zählt zum Beispiel der Bau von Schallschutzwänden an Bahnstrecken, welcher unter anderem im Sonderprogramm „Lärmsanierung an bestehenden Schienenwegen des Bundes“ umgesetzt wird [5, 6]. Neben hohen Investitionen sind z.B. auch Sicherheitsaspekte bei dieser Form der Lärmreduktion (bspw. Zugänglichkeit der Strecke bei Rettungsarbeiten) zu beachten.

Minderungsmaßnahmen im Bereich der Lärmquelle haben eine direkte Auswirkung auf die Lärmentstehung [7, 8]. Seit einigen Jahren ist die Umrüstung der Güterwagenflotte auf lärmarme Bremssohlen ein zentrales Projekt in Deutschland. Ein lärmabhängiges Trassenpreissystem auf dem deutschen Schienennetz hat dabei eine Anreizwirkung auf die Wagenhalter bzw. Eisenbahnverkehrsunternehmen, möglichst lärmarme Güterwagen einzusetzen, um Zuschläge beim Trassenpreis zu vermeiden [9, 10]. Ein Güterzug gilt allerdings erst dann als leise, wenn sämtliche Güterwagen mit lärmarmen Bremssohlen ausgerüstet sind [11]. Bereits einzelne laute Güterwagen heben den durchschnittlichen Lärmpegel eines Güterzugs stark an.

Die Maßnahmen im Bereich Infrastruktur und Fahrzeug werden seit einigen Jahren zusätzlich durch ordnungspolitische Vorhaben flankiert. Das neue Schienenlärmschutzgesetz sieht praktisch ein Fahrverbot von lauten Güterwagen auf

dem deutschen Schienennetz ab Dezember 2020 vor [11]. Ausnahmen vom Verbot gehen mit deutlichen Einschränkungen bei der Trassenvergabe einher, z. B. in Form von nur kurzfristig möglichen Trassenanmeldungen und Geschwindigkeitsreduzierungen für laute Güterzüge. Ein Lärmmonitoring-System befindet sich im Aufbau und soll die Minderungswirkung der zahlreichen Maßnahmen transparent darstellen [1].

Dennoch schöpfen die genannten Maßnahmen noch nicht alle Möglichkeiten zur Lärminderung aus. Bislang fand, wie eingangs in Kapitel 1 erwähnt, der wetterbedingte Einfluss auf die Lärmausbreitung wenig Beachtung. So können bestimmte Wetterlagen (spezielle Windrichtungen oder Inversion) an topografisch ungünstigen Stellen die Lärmwirkung entlang von Bahnstrecken erheblich verstärken, wie vergleichbare Studien im Straßenverkehr gezeigt haben [12].

Diesen Studien zufolge steigt der Lärmpegel bei entsprechenden Windbedingungen um 3 bis 5 dB an. Dies betrifft insbesondere Anwohner, die nicht in unmittelbarer Nähe wohnen. In unmittelbarem Umfeld der Bahnstrecke hat das Wetter weniger Einfluss auf die Lärmbelastung, doch je weiter die Entfernung von der Schiene, umso mehr beeinflussen die Wetterbedingungen die Schallausbreitung.

Untersuchungen von z. B. Heimann et. al. 2014 haben gezeigt, wie das Zusammenspiel der Lärmbelastung von der Quelle bis zum Empfänger durch die Umgebungsbedingungen beeinflusst werden kann [13].

Aktuell wird ein Projekt mit dem Titel „Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen unter Einbeziehung von Geräuschemissionsdaten des Verkehrsträgers Straße und meteorologischer Daten (02.0416)“ der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) abgeschlossen, das sich diesen Fragestellungen für den Straßenverkehr widmet. Es zeigt den Zusammenhang zwischen Windbedingungen und der Schallausbreitung und verdeutlicht, dass ein Unterschied von -10 dB bei Gegenwind und +3 bis +5 dB bei Mitwind vorliegen kann [14].

3 Methodik und Szenarien

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 2 skizzierten aktuellen Ansätze wird im Folgenden das methodische Vorgehen zur Untersuchung der lärmbedingten Geschwindigkeitsreduzierung von Güterzügen und deren Auswirkung auf Streckenleistungsfähigkeit und Betriebsqualität vorgestellt.

3.1 Methodik

Die methodische Herangehensweise gliedert sich in drei Schritte:

Im ersten Schritt wird eine mikroskopische Eisenbahnbetriebssimulation mit RailSys® durchgeführt. Es wird ein Simulationsmodell mit einer generischen Stre-

cke erstellt, die sich an stark frequentierten Mischverkehrsstrecken mit einem hohen Güterzugaufkommen orientiert, wie sie in Deutschland existieren. Die Strecke ist gekennzeichnet durch eine hohe Streckenauslastung und einen hohen Anteil an Güterzügen für Betrachtungen im Hinblick auf Streckenkapazität und Lärminderung. Für die Abbildung des Bahnbetriebs werden eine exemplarische Infrastruktur, ein fiktiver Fahrplan sowie Modellzüge in das RailSys®-Simulationsmodell aufgenommen. Der Fahrplan orientiert sich am aktuellen Betriebsprogramm einer vergleichbaren Strecke. Dabei verkehren die Güterzüge mit ihrer herkömmlichen Geschwindigkeit. Es erfolgt zunächst eine fahrdynamische Simulation einzelner Zugfahrten.

Im zweiten Schritt erfolgen detaillierte Berechnungen der Schallausbreitung in der Umgebung der Bahnstrecke (200 bis 500 m Entfernung) unter Verwendung der fahrdynamischen Berechnungen aus Schritt 1 (s. Kapitel 4). Der Schallpegel am Immissionsort ist abhängig von Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Temperaturschichtung (unterschiedliche Lärmausbreitung je nach Tages- und Jahreszeit) sowie der Geschwindigkeit des Güterzugs. In Tab. 1 sind diese Abhängigkeiten dargestellt.

Gemäß Tab. 1 wird das am Streckenabschnitt vorherrschende Lärmniveau bei wenig Wind bzw. Windstille sowie neutraler Temperaturschichtung als Referenzniveau betrachtet (Fall b). Ein starker Wind vom Immissionsort in Richtung Bahnstrecke (Gegenwind, vom Empfänger zur Quelle) lässt eine geringe Lärmbelastung unterhalb des Referenzniveaus erwarten (Fall a). Dieser Fall wird in dieser Untersuchung nicht betrachtet, da die Wetterbedingungen die Lärmbelastung bereits reduzieren. Liegen günstige Schallausbreitungsbedingungen vor, z.B. starker Wind von der Quelle in Richtung des Immissionsorts (Mitwind, von der Quelle zum Empfänger) in Verbindung mit einer schallbegünstigenden Temperaturschichtung (Inversion), ist von einer erhöhten Lärmimmission auszugehen (Fall c). Fall d ist Gegenstand der Untersuchungen in diesem Projekt.

| Fall | Güterzuggeschwindigkeit in km/h | Wind- geschwindigkeit | Windrichtung | Temperatur- schichtung | Lärmimmission |
|------|------------------------------------|--------------------------|--------------|---------------------------|-----------------------------|
| a | 100 | hoch | Gegenwind | schallhem- mend | unterhalb Referenzniveau |
| b | 100 | niedrig | Windstille | neutral | Referenzniveau |
| c | 100 | hoch | Mitwind | schallbe- günstigend | erhöht |
| d | zu ermitteln | Variation | Variation | Variation | möglichst Referenzniveau |

Tab. 1: Abhängigkeiten der Lärmimmission von ausgewählten Faktoren

Aus den Abhängigkeiten in Fall d ergeben sich verschiedene meteorologische Szenarien. Für diese Szenarien soll berechnet werden, auf welchen Wert die Güterzuggeschwindigkeit abgesenkt werden muss, um den erhöhten Schallpegel durch den lärmverstärkenden Einfluss der Wetterbedingungen zu mindern. Diese Geschwindigkeit kann je nach Szenario und Wetterbedingungen unterschiedlich ausfallen und soll nur so wenig wie nötig reduziert werden, um den Bahnbetrieb nur so wenig wie möglich zu stören. Bspw. ist bei schwacher Windstärke nur eine geringe Geschwindigkeitsbeschränkung notwendig, um den lärmverstärkenden Effekt in der Schallausbreitung zu reduzieren. Das Ziel ist es, das Referenzniveau aus Fall b zu erreichen.

Im letzten Schritt erfolgt erneut eine Simulation des Bahnbetriebs in Form differenzierter bahnbetrieblicher Szenarien und unter Simulation ganzer Fahrplantage. Dabei werden die im vorigen Schritt ermittelten, reduzierten Güterzuggeschwindigkeiten berücksichtigt. Im Gegensatz zum ersten Schritt verkehren die Güterzüge nun mit reduzierter Höchstgeschwindigkeit. Der Fokus liegt auf der Untersuchung der Betriebsqualität und Kapazität des betrachteten Streckenabschnitts (s. Kapitel 5).

3.2 Szenarien

Für die Simulation von Schallausbreitung und Bahnbetrieb werden verschiedene Szenarien definiert. Die Szenarien der Verkehrsmeteorologie resultieren aus einer Variation der Parameter aus Tab. 1 und sind in Tab. 2 dargestellt. Sie orientieren sich an dem etablierten Berechnungsverfahren HARMONOISE [15, 16, 17], welches Wetterbedingungen explizit in der Berechnung verarbeitet.

Für die Windstärke werden zwei verschiedene Intensitäten angenommen, die mit W1 (Windstille) und W3 (leichter bis mäßiger Wind) bezeichnet werden. Für den Einfluss der Windrichtung wird zwischen Gegenwind, Windstille sowie Mitwind unterschieden. Bei der Temperaturschichtung wird zwischen einer neutralen Standardschichtung (S3), einer schallhemmenden, labilen Schichtung (S1) sowie einer stabilen, schallbegünstigenden Schichtung (S5) differenziert.

Für die Berechnung der Schallausbreitung ergeben sich somit neun verschiedene Szenarien. Insbesondere für die schallverstärkenden Szenarien wird eine entsprechende reduzierte Güterzuggeschwindigkeit ermittelt (s. Kapitel 4).

| Parameter | Variation |
|----------------------|------------------------------------|
| Windgeschwindigkeit | W1: 0-1 m/s, W3: 3-6 m/s |
| Windrichtung | Gegenwind, Windstille, Mitwind |
| Temperaturschichtung | S1: labil, S3: neutral, S5: stabil |

Tab. 2: Variation von Parametern zur Abbildung der meteorologischen Szenarien

| Parameter | Variation |
|----------------------------|---|
| Güterzuggeschwindigkeit | abhängig vom Ergebnis der meteorologischen Berechnungen |
| Länge Langsamfahrabschnitt | 1*, 1000, 2000, 3000 m |
| Betrachtungszeitraum | tags 6-18 Uhr, abends 18-22 Uhr, nachts 22-6 Uhr |
| | * theoretischer Fall |

Tab. 3: Zu variierende Einflussfaktoren für die Untersuchung der bahnbetrieblichen Auswirkungen

Die Untersuchung der bahnbetrieblichen Auswirkungen erfolgt unter Berücksichtigung von drei verschiedenen Einflussfaktoren (s. Tab. 3).

Einerseits erfolgt eine Variation der reduzierten Güterzuggeschwindigkeit, abhängig vom Ergebnis der meteorologischen Berechnungen. Andererseits wird die Länge des Langsamfahrabschnitts für die Güterzüge verändert, um zu ermitteln, ob die räumliche Ausdehnung der reduzierten Geschwindigkeit einen relevanten Faktor für Veränderungen in Streckenkapazität und Betriebsqualität darstellt. Des Weiteren erfolgt eine Unterteilung des Betrachtungszeitraums in Tag-, Abend- und Nachtstunden, um einerseits die verschiedenen Betriebsprogramme und andererseits das unterschiedliche Lärmempfinden der Anwohner je nach Tageszeit berücksichtigen zu können.

4 Schallberechnungen

4.1 Grundlagen zur Schallausbreitung

Die Schallausbreitung durch die Atmosphäre kann aufgrund ihrer Wellencharakteristik anschaulich auch analog zu Lichtstrahlen beschrieben werden. Wie Licht in Richtung des Bereichs mit geringerer Ausbreitungsgeschwindigkeit hin abgelenkt („gebrochen“) wird, werden auch Schallwellen in Richtung des Bereiches mit geringerer Schallgeschwindigkeit hin gebrochen.

Wie in Abb. 2 zu sehen, wird das Schallfeld an einem Immissionsort (also der gemessene Schallpegel beim Empfänger) durch die Umgebungsbedingungen wie Topografie und Meteorologie bestimmt.

Die Topografie beeinflusst das Schallfeld durch Reflexion, Diffraktion (Beugung) und Abschattung. Zusätzlich hat der Zustand der Atmosphäre einen signifikanten Einfluss auf die Schallausbreitung im Freien [18, 19]. Daraus ergeben sich Effekte wie die Brechung von Schallstrahlen durch Wind- und räumliche Temperaturänderungen (Temperaturgradienten), die Schallstreuung an Turbulenzelementen und die Luftabsorption, welche frequenzabhängig ist und stark von der Feuchte der Luft beeinflusst wird [20, 21].

Die Richtung der Schallwellenausbreitung wird z.B. über den Vorgang der Brechung durch das mittlere vertikale Profil von Lufttemperatur und Windvektor bestimmt [22]. Beide Größen finden Eingang in die effektive Schallgeschwindigkeit, die sich additiv aus der (temperaturabhängigen) Schallgeschwindigkeit und der Windkomponente in Schallausbreitungsrichtung zusammensetzt [20].

Ist der Temperaturgradient negativ – hier wird auch von labiler Schichtung gesprochen, die in den warmen Jahreszeiten und tagsüber wesentlich häufiger vorkommt als nachts –, nimmt die Temperatur und somit auch die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe ab und die

Schallwellen werden nach oben gebrochen. Dies entspricht einer schallhemmenden ungünstigen Schallausbreitung und stellt für den Empfänger einen wünschenswerten Zustand dar. Bei positivem Temperaturgradienten – auch stabile Schichtung genannt, die im Winter oder nachts häufiger zu beobachten ist – werden die Schallwellen demgegenüber nach unten gebrochen. Diese Situation wird als ausbreitungsgünstig angesehen und verursacht höhere Lärmpegel beim Empfänger.

Der Wind nimmt normalerweise mit der Höhe zu, übt jedoch einen richtungsabhängigen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit aus. Bei einer Schallausbreitung in Windrichtung steigt die effektive Schallgeschwindigkeit mit der Höhe an, und die Schallstrahlen werden zum Boden hin gebrochen – beim Empfänger wird es lauter. Bei Schallausbreitung in Gegenwindrichtung erfolgt hingegen eine aufwärts gerichtete Brechung.

Aufwärtsbrechung (bei Gegenwind und /oder Temperaturabnahme mit der Höhe) führt zu sogenannten Schallschattenzonen. Dahingegen führt Abwärtsbrechung (bei Mitwind und /oder Temperaturzunahme mit der Höhe, auch Temperaturinversion genannt) zu Fokussierungen.

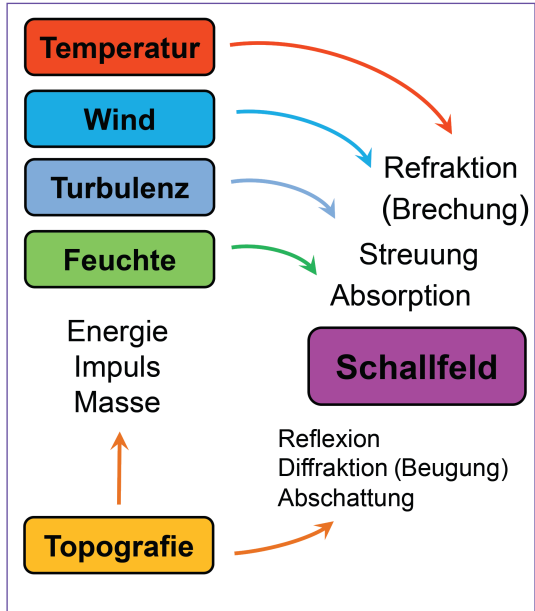


Abb. 2: Schematische Darstellung der Einflüsse von Topografie und Meteorologie bei der Schallübertragung auf das Schallfeld

Wind kann den brechungsbedingten Schalleintrag in abgeschattete Bereiche je nach Windrichtung und -geschwindigkeit verstärken oder abschwächen [23, 24]. Dieser Prozess ist bedeutender für die Schallübertragung von der Quelle bis zum Empfänger. Mitwind- oder Gegenwindsituationen treten unabhängig von Tages- oder Jahreszeit auf und Änderungen im lokalen Schallpegel werden erfahrungsgemäß stärker vom Beobachter wahrgenommen.

Die Abb. 3 und 4 verdeutlichen den Einfluss von Schallaufwärtsbrechung und Schallabwärtsbrechung für die Schallausbreitung.

Wichtig zu wissen ist, wie oft lärmbelastende Wettersituationen auftreten und wie lange sie anhalten. Konstante Wetterlagen sind in Mitteleuropa verglichen mit anderen Teilen auf der Welt eher kurzlebig. Es gibt hier Jahreszeiten, aber keinen Monsun oder lang anhaltende Trockenzeiten.

Relevant für die Schallausbreitung sind z.B. wolkenlose Hochdruckwetterlagen mit hohen Temperaturunterschieden zwischen Tag und Nacht. Diese können sowohl im Winter als auch im Sommer auftreten. Wolkenreiche Westwindwetterlagen mit regnerischem Wetter und niedrigen Temperaturen im Sommer und eher milden Temperaturen im Winter treten verhältnismäßig häufig auf, halten sich in der Regel aber nicht so lange. Lokale Wetterlagen z.B. in Küstennähe oder im Gebirge haben andere charakteristische Zeitskalen und Wettererscheinungen. In Tab. 4 sind die Dauer und die Häufigkeit dieser beiden Wetterlagen zusammengefasst. Häufigkeit und Dauer können aber nur als grobe Orientierung gelten und variieren in der Regel sehr stark.

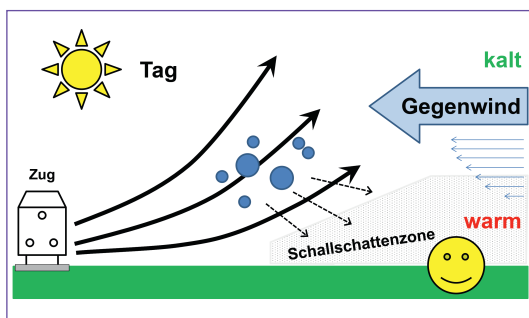


Abb. 3: Einfluss von Wind und Temperaturschichtung auf die Schallausbreitung: ungünstige Ausbreitungsbedingungen mit Aufwärtsbrechung der Schallwellen

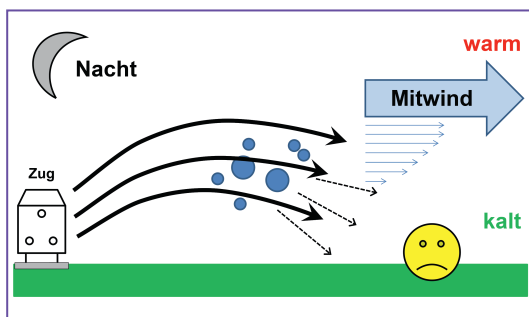


Abb. 4: Einfluss von Wind und Temperaturschichtung auf die Schallausbreitung: günstige Ausbreitungsbedingungen mit Abwärtsbrechung der Schallwellen

| Wetterlage | Auswirkung auf Schallausbreitung | Dauer | Häufigkeit |
|---|---|-------------------------------------|--------------|
| wolkenlos / windschwach, häufig mit Temperaturinversion | tags leiser, nachts lauter | 3-12 Tage im 4-6 h-Rhythmus pro Tag | 1x pro Monat |
| Westwind (> 3 m/s), stark bewölkt, Regenwetter | bei Mitwind lauter, bei Gegenwind leiser, allgemein aber etwas leiser | 2-4 Tage | 2x pro Monat |

Tab. 4: Schallrelevante Wetterlagen für eine Region und die dafür typischen Zeitskalen und Häufigkeiten

Standardisierte Lärmprognoseverfahren (z.B. DIN ISO 9613 [25] oder Schall 03 [26]) werden bei der Erstellung von Lärmkarten benutzt. Sie stellen einen mittleren Pegel dar, der für einen langen Zeitraum gültig ist, und berücksichtigen das Zusammenwirken von dreidimensionalen Reflexionen, Beugungen und Brechung sowie meteorologische Einflüsse pauschal und deshalb nur unzureichend. Meist wird angenommen, dass zwischen einer Quelle vor einem Schallausbreitungshindernis und einem Empfänger dahinter nur ein einziger signifikanter Ausbreitungsweg existiert. Das ist in der Regel der Weg über das Hindernis. Innerhalb der standardisierten Normen DIN ISO 9613-2 wird die meteorologische Situation nur mittels Addition eines konstanten Korrekturterms berücksichtigt. Generell ergibt sich für die DIN ISO 9613-2 eine Änderung um ca. 2 dB bei der Bildung von Langzeitmittlungspegeln durch Berücksichtigung besonderer Schallausbreitungsbedingungen. Hier wird die Mitwindsituation berechnet und ein Langzeitpegel mittels eines Auf- oder Abschlags durch einen Korrekturterm berücksichtigt und resultiert somit in einem konstanten Offset des Pegels. Bei Methoden ohne Berücksichtigung meteorologischer Parameter wird häufig ein Rechenergebnis erreicht, das einen gemessenen Langzeitmittlungspegel überschätzt.

Schallausbreitungsrechenvorschriften wie z. B. HARMONOISE können den Wettereinfluss in die Berechnung mit einbeziehen und somit Schallpegel berechnen, die mit konkreten Situationen vergleichbar sind.

Bedingungen, die in HARMONOISE für einen Pegelanstieg und für eine Pegelreduktion verantwortlich sind, zeigt Tab. 5.

Dabei gilt generell: Labile Schichtungen, wie sie an Sommertagen üblich sind (in HARMONOISE mit S1 bezeichnet), bewirken Aufwärtsbrechung und somit eine Pegelabnahme. Stabile Schichtungen, wie sie nachts oder im Winter häufiger auftreten (in HARMONOISE mit S5 bezeichnet), bewirken Abwärtsbrechung und somit eine Pegelzunahme. Eine neutrale Temperaturschichtung, die kaum Einfluss auf die Schallausbreitung hat, wird als S3 klassifiziert. Davon überlagert werden noch Pegeländerungen durch Mitwind (Pegelzunahme, lauter) und Gegenwind (Pegelabnahme,

| Wind \ Schichtung | S1 (-) labil | S3 (o) neutral | S5 (+) stabil |
|-------------------|--------------|----------------|---------------|
| W3 Gegenwind (-) | - | - | o |
| W1 Windstille (o) | - | o | + |
| W3 Mitwind (+) | o | + | ++ |

Tab. 5: Einfluss durch Temperaturschichtung (S1, S3, S5) und Windverhältnisse (W1, W3 Mitwind und W3 Gegenwind) auf den Immissionspegel; der Referenzfall (W1S3) ohne Wettereinfluss ist fett umrandet; die Symbole bedeuten: (-) Pegelminderung, (o) neutral, (+) Pegelerhöhung

leiser). Die Windgeschwindigkeit wird in HARMONOISE ebenso wie die Temperaturschichtung in Klassen unterteilt. Dabei ist W1 ein fast windstiller Fall von 0-1 m/s, W2 entspricht 1-3 m/s, die Windklasse W3 beschreibt das Intervall von 3-6 m/s. Die höheren Windklassen W4 (6-10 m/s) und W5 (> 10 m/s) sollen hier nicht betrachtet werden, da sie in küstenfernen Regionen relativ selten vorkommen.

Rot ist in Tab. 5 der lauteste Fall „worst case“ bei stabiler Schichtung und deutlichem Mitwind (W3) und dunkelgrün ist der leiseste Fall „best case“ bei labiler Schichtung (S1) und deutlichem Gegenwind (W3). Die Zeile mit dem Fall W1 zeigt die Verhältnisse bei Windstille und somit nur Einflüsse durch die Temperaturschichtung. Die Spalte unter S3 zeigt dagegen den Einfluss, der nur durch den Wind verursacht wird. Der Referenzfall, welcher nicht durch das Wetter beeinflusst wird, ist W1S3, der in Tab. 5 fett umrandet ist.

4.2 Schallberechnung

Die Schallemission von Schienenfahrzeugen ist in erster Linie abhängig von der Geschwindigkeit des Zuges, aber auch Zugart, Länge und Faktoren des Schienenbettes spielen eine Rolle. Sie kann anhand der Vorschrift Schall 03 berechnet werden.

Dazu wird ein Korrekturterm für die Schallemission gemäß der 16. Bundesimmissionschutzverordnung (BImSchV) [26] in Abhängigkeit von Zuglänge und Geschwindigkeit bestimmt (Abb. 5).

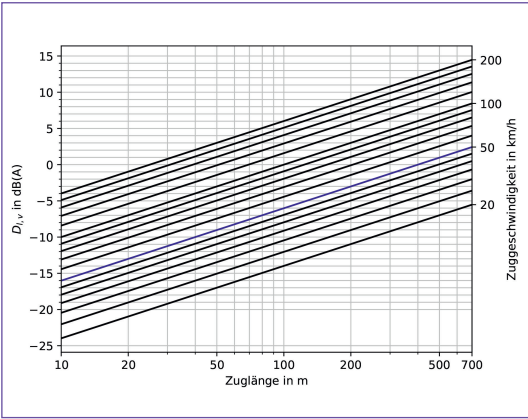


Abb. 5: Korrekturterm $D_{l,v}$ für die Schallemission in Abhängigkeit von Zuglänge und Geschwindigkeit, berechnet gemäß 16. BImSchV

| | Länge 300 m | Länge 500 m | Delta (L) Länge | Delta gegen 100 km/h, längenunabhängig |
|------------------------|----------------|----------------|--------------------|---|
| Geschwindigkeit (km/h) | dB | dB | dB | dB |
| 50 | 44,7 | 46,9 | 2,2 | 6 |
| 60 | 46,3 | 48,5 | 2,2 | 4,4 |
| 70 | 47,6 | 49,8 | 2,2 | 3,1 |
| 80 | 48,8 | 51 | 2,2 | 1,9 |
| 90 | 49,8 | 52 | 2,2 | 0,9 |
| 100 | 50,7 | 52,9 | 2,2 | 0 |

Tab. 6: Schallemission eines Güterzugs in dB je nach Länge und Geschwindigkeit, berechnet gemäß Schall 03

Zuerst werden alle möglichen und realistischen Quellkonfigurationen untersucht. Dafür wird eine Tabelle mit der Lärmemission von einem Güterzug unterschiedlicher Geschwindigkeit und Länge berechnet (Tab. 6). Für die Lärmkartierung wird diese Emission auf N Güterzüge hochgerechnet, wobei auch eine Gewichtung mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Längen möglich ist.

Man erkennt eine Streuung von 7,3 dB zwischen dem langsamsten und kürzesten Zug (44,7 dB) und dem schnellsten und längsten Zug (52,9 dB). Bei unveränderter Länge der Züge beträgt der Unterschied durch die Geschwindigkeit zwischen 50 km/h und 100 km/h 6 dB. Diese Differenz ist von der Zuglänge unabhängig. Der Längenunterschied der Züge zwischen 300 m und 500 m bewirkt hingegen ein Delta (L) von 2,2 dB für alle Geschwindigkeiten.

Schließlich ist die Kenntnis der Schallpegelabnahme mit der Entfernung unter den verschiedenen Wetterbedingungen erforderlich (Abb. 6).

Verglichen werden hier die Berechnungsmethode nach Schall 03 – die keine besondere Wetterbedingungen berücksichtigt und als Vergleichsfall für Normalbe-

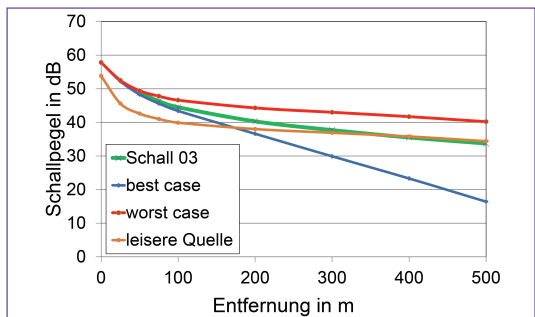


Abb. 6: Schallpegelabnahme mit der Entfernung, berechnet mittels der Rechenvorschrift Schall 03 (grün) und mittels HARMONOISE für eine vergleichbare Industrie-Linienquelle und eine leisere Quelle (orange), sowie die Pegelabnahme mit der Entfernung unter ungünstigen (blau) und günstigen (rot) Schallausbreitungsbedingungen

dingungen unter HARMONOISE angesehen werden kann – mit den verschiedenen wetterbeeinflussten Ausbreitungsbedingungen unter HARMONOISE. Man erkennt, dass die Quellstärke für die drei Fälle schallausbreitungsgünstig (rot), Normalbedingungen (entspricht Schall 03, grün) und schallausbreitungsungünstig (blau) jeweils gleich ist (ca. 57 dB). Unter schallausbreitungsungünstigen Bedingungen nimmt der Pegel mit der Entfernung schneller ab, während er dies für schallausbreitungsgünstige Verhältnisse nicht tut.

Ziel ist es also, durch eine Verringerung der Geschwindigkeit den Schallpegel bereits an der Quelle so stark zu reduzieren, dass im weiteren Verlauf (hier bei ca. 500 m) derselbe Pegel erreicht wird, der unter Normalbedingungen beim Empfänger herrscht. Dies wird in Abb. 6 durch die „leisere Quelle“ (orange) dargestellt.

Es wurden Berechnungen bei standardisierten Bedingungen und Vergleichsberechnungen mit den wetterbeeinflussten, schallausbreitungsgünstigen / -ungünstigen Bedingungen mittels HARMONOISE durchgeführt und analysiert.

Die Schallpegelabnahme mit der Entfernung ist je nach Wetterlage unterschiedlich – wie in Tab. 7 und Abb. 6 zu sehen – und es empfiehlt sich, sich auf einen Referenzpegel z. B. in 500 m Entfernung zu beziehen. In dem hier vorliegenden Fall sind das 33,8 dB.

Durch Wettereffekte wird dieser Pegel erhöht oder vermindert. Im „worst case“ bei Mitwind und stabiler Schichtung S5 (Inversion) steigt der Wert auf 40,2 dB, ist also um 6,4 dB lauter. Im „best case“ bei Gegenwind und labiler Schichtung würde man den Zug in 500 m Entfernung fast nicht mehr hören. Der Pegel beträgt gemäß HARMONOISE dann 16,4 dB und ist also um 17,4 dB leiser.

| | Pegel Lr | | |
|--|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | best case Gegenwind (W3S1) | Vergleichsfall (W1S3) | worst case Mitwind (W3S5) |
| Entfernung von der Quelle in m (Emission) | dB(A) | dB(A) | dB(A) |
| | 57,8 | 57,8 | 57,8 |
| 25 | 52,2 | 52,4 | 52,5 |
| 50 | 48,3 | 48,8 | 49,4 |
| 75 | 45,6 | 46,6 | 47,8 |
| 100 | 43,4 | 44,8 | 46,6 |
| 200 | 36,6 | 40,3 | 44,3 |
| 300 | 29,9 | 37,6 | 43,0 |
| 400 | 23,3 | 35,5 | 41,7 |
| 500 | 16,4 | 33,8 | 40,2 |

Tab. 7: Schallpegel in Abhängigkeit von der Entfernung und den extremen Wettereinflüssen in HARMONOISE

Die Aufgabe ist es jetzt, die Lärmemission eines Güterzuges durch Reduktion der Geschwindigkeit so weit zu verringern, bis der Immissionspegel in 500 m Entfernung wieder dem Pegel unter Normalbedingungen entspricht.

Es wurden somit Variantenberechnungen mit den verschiedenen Temperaturschichtungen und Windrichtungen sowie verschiedenen Windrichtungen bei gleichbleibenden Temperaturschichtungen gemäß HARMONOISE durchgeführt, so wie in Kapitel 3.2 beschrieben.

Die berechneten Einflüsse der einzelnen Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Temperaturschichtungen auf den Pegel in 500 m Entfernung sind als Pegeländerung bezüglich des Normalfalls (kein Wind, neutrale Schichtung) in Tab. 8 zusammengefasst. Die Variation der Windrichtung hat den größten Einfluss auf den Schallpegel (vgl. Mitwind zu Gegenwind). Änderungen der Temperaturschichtungen ergeben aber für den Mitwindfall zusätzliche Pegeländerungen von 3,1 dB auf 6,4 dB unter schallausbreitungsgünstiger Temperaturschichtung. Ebenso für den Fall bei Windstille ist die Temperaturschichtung ein sehr wichtiges Kriterium, ob es zu Pegelanstieg (S5) oder Pegelverringern (S1) kommt.

Tab. 9 zeigt dann entsprechend die nötige Geschwindigkeit, um den Schallpegel in 500 m Entfernung zu erreichen, der sonst unter Normalbedingungen herrscht.

| Wind \ Schichtung | S1 (-) labil | S3 (o) neutral | S5 (+) stabil |
|-------------------|--------------|----------------|---------------|
| W3 Gegenwind (-) | -17,4 | -15,7 | -15,8 |
| W1 Windstille (o) | -7,9 | 0 | +6,1 |
| W3 Mitwind (+) | +3,1 | +4,2 | +6,4 |

Tab. 8: Schallpegeländerung in dB in 500 m Entfernung bei entsprechender Wetterlage relativ zu Normalbedingungen; die Symbole bedeuten: (-) Pegelminderung, (o) neutral, (+) Pegelerhöhung

| Wind \ Schichtung | S1 (-) labil | S3 (o) neutral | S5 (+) stabil |
|-------------------|--------------|----------------|---------------|
| W3 Gegenwind (-) | 100 | 100 | 100 |
| W1 Windstille (o) | 100 | 100 | 50 |
| W3 Mitwind (+) | 70 | 60 | 50 |

Tab. 9: Güterzuggeschwindigkeiten in km/h, die bei entsprechender Wetterlage einzuhalten sind, um etwa den Immissionspegel unter Normalbedingungen zu erreichen

5 Eisenbahnbetriebssimulation

5.1 Vorgehen

Die anhand meteorologischer Untersuchungen ermittelte veränderte maximale Geschwindigkeit für Güterzüge wird bahnbetrieblich als Langsamfahrstelle (La-Stelle) umgesetzt. Diese bezeichnet den Abschnitt einer Bahnstrecke, an dem vorübergehend eine abweichende Geschwindigkeit gegenüber der maximal fahrbaren Geschwindigkeit gefahren werden muss [27]. Im Realbetrieb gilt eine La-Stelle für sämtliche Züge auf dem Streckenabschnitt (meist infrastrukturbedingt). In dieser Untersuchung gilt hingegen die Besonderheit, dass die La-Stelle nur für Güterzüge zutrifft und aus betrieblichen Gründen angeordnet wird.

Deren Auswirkungen auf die Kapazität und Betriebsqualität des Streckenabschnitts wurden mittels eines mikroskopischen Simulationsmodells in der Software RailSys® untersucht. Die Auswahl begründet sich im hohen Detailgrad des Modells und der zugenauen Abbildung einzelner Fahrten. Außerdem können die Auswirkungen von La-Stellen auf den Bahnbetrieb im Vergleich zu anderen Methoden zur Kapazitätsuntersuchung [28] in einem stark operativen Kontext untersucht werden. Zusätzlich bietet das Tool die Möglichkeit, die La-Stelle gezielt für Güterzüge zu modellieren.

Als Indikator für die Betriebsqualität wurde der Verspätungszuwachs gewählt. Dieser berechnet sich aus der Differenz von Einbruchs- und Ausbruchsverspätung eines Zuges, der den Untersuchungsraum durchfährt. Der Parameter kann drei verschiedene Zustände annehmen [29]. Ein positiver Verspätungszuwachs zeugt von verbesserungswürdiger Betriebsqualität, da die Verspätung der Züge beim Durchlaufen des Systems wächst. Im Gegenteil dazu zeugt ein negativer Verspätungszuwachs von guter Betriebsqualität. Die Züge können Verspätung abbauen und möglicherweise können weitere Trassen in den Fahrplan eingelegt werden. Ein Verspätungszuwachs um den Wert 0 zeugt von „zufriedenstellender“ Betriebsqualität.

Es ist zu erwarten, dass durch Eingriffe in den Bahnbetrieb in Form von La-Stellen der Verspätungszuwachs der Züge im Durchschnitt steigen wird. Dadurch sinkt die Betriebsqualität. Dem kann entgegengewirkt werden, indem die Anzahl an Zügen reduziert wird. Indem diese dadurch weniger dicht verkehren, wird ihnen erleichtert, die durch die La-Stelle erfahrene Verspätung abzubauen, da die Wahrscheinlichkeit eines Konfliktes mit einem anderen Zug sinkt. Prinzipiell erlauben die gemäß [30] angenommenen Regelfahrzeitzuschläge einen Verspätungsabbau.

Aus den geschilderten Zusammenhängen kann folgende Hypothese abgeleitet werden: Um der durch eine La-Stelle bewirkten Verschlechterung der Betriebsqualität

entgegenzuwirken, kann die Anzahl der Züge im System reduziert werden. Dies kann schrittweise so lange erfolgen, bis der Referenzwert der Betriebsqualität aus dem Basisfahrplan ohne La-Stelle wieder erreicht wird. Die ermittelte Anzahl reduzierter Trassen gibt dann Aufschluss über die Auswirkungen der La-Stelle auf die Kapazität des Streckenabschnittes.

Wie in Kapitel 3 erläutert, fließen drei Einflussfaktoren in die bahnbetriebliche Auswertung ein. Zunächst wird der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Betriebsqualität untersucht. Dabei finden die in Kapitel 4 ermittelten Zielwerte Verwendung. Dort wurde auch erläutert, dass bzgl. der Lärmausbreitung ein nicht zu vernachlässigender Unterschied zwischen den unterschiedlichen Tageszeiten besteht, sodass diese Unterscheidung mit in die bahnbetriebliche Analyse aufgenommen wurde.

Zuletzt wird die Abhängigkeit der Betriebsqualität von der Länge der La-Stelle untersucht. Dies soll Aufschluss darüber geben, ob längere La-Stellen den Betrieb wesentlich stärker beeinflussen als kurze oder bereits mit sehr kurzen La-Stellen der Verspätungszuwachs sprunghaft ansteigt (aus diesem Grund wird später auch die theoretische Länge einer La-Stelle von 1 m mit einbezogen).

5.2 Streckenabschnitt

Für die Eisenbahnbetriebssimulation wird eine zweigleisige, generische Strecke modelliert, die an eine stark frequentierte Mischverkehrsstrecke mit hohem Güterzugaufkommen angelehnt ist. Die Streckenhöchstgeschwindigkeit beträgt 160 km/h bei einer Streckenlänge von ca. 60 km. Der Untersuchungsraum ist durch zwei größere Knotenbahnhöfe am Anfang und Ende der Strecke begrenzt. Der Streckenverlauf ist unterteilt durch Betriebsstellen unterschiedlicher Größe und Komplexität, einzelne davon mit Überholmöglichkeiten zur Änderung der Zugreihenfolge. Der gewählte Streckenabschnitt wird als hochbelasteter Engpassabschnitt definiert. Ein solcher Abschnitt lässt bei betrieblichen Eingriffen wie bspw. einer reduzierten Güterzuggeschwindigkeit eine besonders hohe Sensitivität hinsichtlich Streckenkapazität und Betriebsqualität erwarten. Die Definition als Engpassabschnitt spiegelt sich im Betriebsprogramm wider. Der Fahrplan ist gekennzeichnet durch einen hohen Anteil an Güterzügen. Des Weiteren verkehren auf der Strecke mehrere Linien des Schienenpersonenfernverkehrs sowie zahlreiche Nahverkehrszüge. Hinsichtlich der gewählten Modellzüge für den Personenverkehr wird unterschieden zwischen schnellen Produkten wie ICE und IC sowie Regionalverkehr (RE, RB). Die Güterzüge werden in vier verschiedene Modellzug-Kategorien zusammengefasst (Container, Massengut, Ganzzug, Mischgüter). Für die Zugzahlen der einzelnen Zuggattungen werden Annahmen getroffen, die sich an vergleichbaren Mischverkehrsstrecken in Deutschland orientieren [1, 31, 32, 33].

5.3 Simulationsergebnisse

Für die unterschiedlichen Untersuchungen wurden 100 Simulationsläufe pro Datenpunkt durchgeführt. Zur Kompensation der wetterbedingten Einflüsse auf die Schallausbreitung sind gemäß Tab. 9 in Kapitel 4 in den für den Bahnbetrieb ungünstigen Fällen Höchstgeschwindigkeiten für Güterzüge von 50 bis 70 km/h nötig. Zudem legt [34] nahe, dass ein Betrieb mit unter 50 km/h mit hohen zusätzlichen Aufwänden bei der Trassenerstellung verbunden ist. Aus diesem Grund wird nachfolgend der Wertebereich zwischen 50 und 70 km/h in den Abbildungen besonders hervorgehoben.

Abb. 7 zeigt die Entwicklung der Betriebsqualität bei verschiedenen Maximalgeschwindigkeiten für Güterzüge, bewirkt durch eine La-Stelle von 2000 m.

In Abb. 7 ist zunächst der Durchschnittswert über alle Züge und beide Richtungen dargestellt, unterschieden nach Tageszeit (durchgezogene Linien). Dabei ist zu beobachten, dass sich die Betriebsqualität im Basisfahrplan im zufriedenstellenden Bereich aufhält. Wie zu erwarten, steigt der Verspätungszuwachs mit dem Einführen einer La-Stelle an – die Betriebsqualität sinkt. Mit sinkender erlaubter Höchstgeschwindigkeit verstärkt sich dieser Effekt. Dabei sind die stärksten Anstiege im Verspätungszuwachs im Bereich zwischen 70 und 50 km/h zu vermerken. Der Einfluss der Tageszeit unterliegt Schwankungen: Während im Basisfahrplan die beste Betriebsqualität nachts vorliegt und die schlechteste tagsüber, kehrt sich dieser Zusammenhang mit Einführen von La-Stellen um. Dies liegt daran, dass sich der Einfluss der La-Stelle (die nur Güterzüge betrifft) nachts aufgrund des höheren Anteils am Gesamtbetriebsprogramm stärker auswirkt.

Abb. 7 ergänzt den Durchschnittswert über alle Züge darüber hinaus um den Verspätungszuwachs der Güterzüge (gestrichelte Linien). Dieser liegt vom Niveau her deutlich über den Durchschnittswerten. Demnach ist die Betriebsqualität der Güterzüge durchgehend schlechter als die der Personenzüge. Dies erscheint plausibel, da die La-Stelle wie oben erwähnt nur auf diese Zugattung zutrifft. Zudem spiegelt sich die Dispositionsroutine wider, die Personenzüge im Konfliktfall priorisiert. Hier steigt die Kurve des Zeitraums „Nacht“ (grün gestrichelt) etwas stärker an als die Kurve tagsüber. Dies liegt

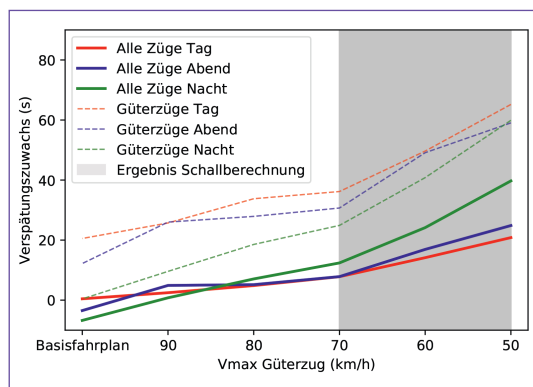


Abb. 7: Entwicklung der Betriebsqualität bei unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten (nach Tageszeit, Länge der La-Stelle: 2000 m)

daran, dass die Güterzüge tagsüber durch den Personenverkehr ohnehin schon stark behindert werden und die La-Stelle dadurch keinen maßgeblichen zusätzlichen Einfluss auf die Betriebsqualität hat. Nachts jedoch wirkt sich diese deutlich stärker aus, da die Güterzüge andernfalls vergleichsweise ungehindert das System passieren können (da nachts wenig bis kein Personenverkehr stattfindet).

In Abb. 7 wird aufgezeigt, dass insbesondere im Geschwindigkeitsbereich, der aus der Schallberechnung hervorging (grau markiert), der Verspätungszuwachs zu allen Tageszeiten durch Einführen einer La-Stelle steigt. Die lärmbedingte Geschwindigkeitsreduzierung geht demnach mit einer Verschlechterung der Betriebsqualität einher.

Abb. 8 zeigt, wie sich die schlechtere Betriebsqualität auf die Kapazität des Streckenabschnitts auswirkt. Dazu wurden exemplarisch die La-Stellen mit 60 km/h und 70 km/h verwendet.

In Abb. 8 wird der Verspätungszuwachs bei Betrieb mit einer La-Stelle mit 60 bzw. 70 km/h von 2000 m Länge dargestellt. Untersucht wurde der Zeitraum tagsüber von 6 bis 18 Uhr, in dem im Simulationsmodell 79 Güterzüge für beide Richtungen verkehren. Wie in Kapitel 5.1 vermutet, kann der Verspätungszuwachs reduziert (und dadurch die Betriebsqualität verbessert) werden, indem die Anzahl an Zügen (hier: Güterzüge) reduziert wird. Dies macht der Verlauf beider Kurven deutlich. Die horizontale, gestrichelte schwarze Linie zeigt das Niveau der Betriebsqualität aus dem Basisfahrplan an, mit der ursprünglichen Anzahl an Zügen und ohne La-Stelle. Der Schnittpunkt beider Linien zeigt an, dass gemäß der in Kapitel 5.1 formulierten Hypothese im untersuchten System die Anzahl der Güterzüge tagsüber um ca. 30 bis 50 Züge reduziert werden müsste, um eine Betriebsqualität zu erreichen, die dem Basisfahrplan entspricht (je nach Fall). Diese Reduktion entspräche in diesem Zeitraum im Simulationsmodell einem Anteil von 40 bis 60% der Güterzüge. Dies bedeutet einen massiven Eingriff in den Bahnbetrieb und würde mit hoher Wahrscheinlichkeit erhebliche wirtschaftliche Einbußen nach sich ziehen. Von Bedeutung ist an dieser Stelle der erneute Hinweis auf den Simulationszeitraum tagsüber (6 bis 18 Uhr). Vor diesem Hintergrund erscheint die zu reduzierende Zahl besonders schwerwiegend, da in diesem Zeitraum aufgrund von Kapazitätsengpässen ohnehin nur eine äußerst begrenzte Anzahl an Güterzügen fahren

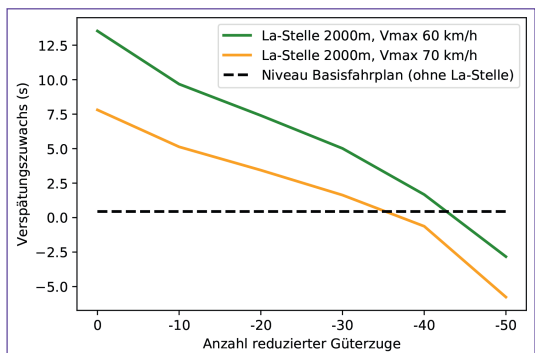


Abb. 8: Betriebsqualität über Anzahl reduzierter Trassen (Tag: 6 bis 18 Uhr)

kann. Abb. 7 zeigt, dass die Betriebsqualität insbesondere bei La-Stellen im Bereich 50 bis 70 km/h nachts schlechter ausfällt als tagsüber. Daher ist nachts mit noch stärkeren Trassenverlusten zu rechnen.

Zu beachten ist, dass die ermittelte Anzahl reduzierter Güterzüge eine vollständige Kompensation der durch eine bestimmte Wetterlage verstärkten Lärmausbreitung unterstellt. Eine Lärminderung kann auch bereits durch eine geringere Geschwindigkeitsreduktion erreicht werden. Dann wäre die Anzahl der reduzierten Güterzugtrassen entsprechend geringer.

Abb. 9 stellt die Abhängigkeit der Betriebsqualität von der Länge der La-Stelle dar. Hier sind zwei wesentliche Effekte zu erkennen:

Zunächst zeigt die blaue Kurve, dass eine (theoretische) La-Stelle von nur 1 m keine sprunghafte Verschlechterung der Betriebsqualität zu bewirken scheint. Vielmehr steigen die einzelnen Kurven mit geringer Unregelmäßigkeit an.

Es zeigt sich außerdem, dass die Länge der La-Stelle einen recht starken Einfluss auf die Betriebsqualität zu haben scheint. Dies verstärkt sich mit abnehmender erlaubter Geschwindigkeit und betrifft insbesondere den ermittelten Geschwindigkeitsbereich zwischen 50 und 70 km/h (vgl. Ergebnisse Kapitel 4). Es kann umgekehrt jedoch auch abgeleitet werden, dass kürzere La-Stellen einen deutlich geringeren Einfluss auf die Betriebsqualität haben. Die Länge eines La-Abschnittes unterliegt sicherlich häufig Einzelfallentscheidungen. Die optimale Länge einer solchen modifizierten La-Stelle bleibt somit Gegenstand weiterer Untersuchungen.

6 Diskussion und Ausblick

Ziel dieser Untersuchung war das Aufzeigen der Machbarkeit einer lärmbedingten Geschwindigkeitsreduzierung für Güterzüge vor dem Hintergrund einer wetterbeeinflussten Lärmausbreitung und deren Auswirkung auf den Bahnbetrieb. Lärmberechnungen ergaben, dass die Lärmbelastung von Anwohnern an Bahnstrecken bei günstigen Schallausbreitungsbedingungen durch eine Reduzierung der Güterzuggeschwindigkeit signifikant gesenkt werden kann. Je nach Wetterbedingungen kann dadurch ein Lärmpegel erreicht werden, der vergleichbar ist zu Normalbedingungen ohne Wettereinfluss.

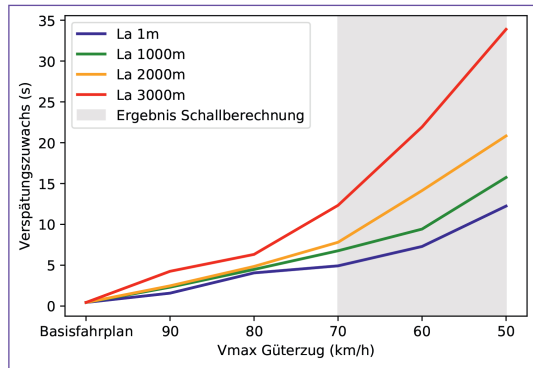


Abb. 9: Betriebsqualität abhängig von der Länge der La-Stelle (Tag: 6 bis 18 Uhr)

Andererseits bestätigt die anschließende bahnbetriebliche Untersuchung, dass die dazu nötige Reduktion der Güterzuggeschwindigkeit erhebliche Auswirkungen auf den Bahnbetrieb hat – der untersuchte Primärparameter des Verspätungszuwachses verschlechterte sich in vielen Fällen im Simulationsmodell drastisch. Insbesondere vor dem Hintergrund einer stark frequentierten Mischverkehrsstrecke wird sich die Betriebsqualität und Streckenkapazität bei Reduzierung der Geschwindigkeit von Güterzügen deutlich verschlechtern.

Es zeigt sich, dass je nach Geschwindigkeitsreduktion, Tageszeitraum sowie Länge der La-Stelle teils erhebliche Einbußen bei Betriebsqualität und Streckenkapazität hinzunehmen sind. So ist bspw. die Anzahl an Güterzügen tagsüber von 6 bis 18 Uhr bei einer reduzierten Güterzuggeschwindigkeit von 60 km/h und einer La-Stelle von 2000 m Länge um ca. 50% zu reduzieren, um eine Betriebsqualität zu erreichen, die der des Basisfahrplans entspricht.

Das in dieser Untersuchung dargestellte Verfahren bietet jedoch auch Vorteile. So kann das Verfahren dynamisch geregelt und angewendet werden. Die bedarfsgerechte Anwendung des Verfahrens ähnelt dabei Systemen, die zeitweilige Tempolimits z. B. auf Straßenabschnitten steuern, um je nach Tageszeit den Lärmschutz sicherzustellen. Das bedeutet übertragen auf das hier beschriebene Verfahren, dass bei guter Wetterlage konventioneller Betrieb mit ursprünglicher Höchstgeschwindigkeit möglich ist und Einschränkungen nur dann bestehen, wenn dies die Bedingungen erfordern.

Außerdem ist das Erschließen von zusätzlichem Lärminderungspotenzial in der Regel mit sehr hohen Investitionen verbunden, z. B. durch eine umfassende Modernisierung des Wagenparks oder infrastrukturelle Maßnahmen wie die Errichtung von Schallschutzwänden. Die hier vorgestellte Vorgehensweise könnte in dieser Hinsicht insofern eine Alternative darstellen, als dass überwiegend in Technologie anstatt Infrastruktur investiert wird. Zu prüfen wäre z. B. die Integration der Geschwindigkeitsanweisung in Fahrerassistenz- oder Zugsicherungssysteme, damit die Güterzüge direkt beeinflusst werden können. Dies würde ein gezieltes Einsetzen der Maßnahme dort ermöglichen, wo die Lärmbelastung für die Anwohner aufgrund von Wettereinflüssen und Topografie besonders ausgeprägt ist.

Ein entscheidender Nachteil des Verfahrens ist allerdings die je nach Höhe der Geschwindigkeitsreduktion teils stark sinkende Streckenkapazität und Betriebsqualität. Im Simulationsmodell konnte nur durch die Aufgabe zahlreicher Güterzugtrassen die Betriebsqualität des Basisfahrplans gehalten und konnten so die negativen Auswirkungen auf andere Züge (z. B. Verspätungsübertragung auf den Personenverkehr) begrenzt werden. Außerdem nimmt für die verbleibenden Güterzüge im Fahrplan die Transportzeit zu, da das Durchfahren der La-Stelle die Fahrzeit steigert. Falls im Streckennetz mehrere lärmbedingte La-Stellen eingerichtet würden, könnte dies in Summe u. a. zu

späteren Ankünften am Zielbahnhof, verspäteten Lieferketten, längeren Umlaufzeiten und einem höheren Fahrzeugbedarf führen. Des Weiteren lässt das Abbremsen und Beschleunigen vor und nach einer La-Stelle neben der Fahrzeit auch den Energiebedarf ansteigen. Die aus den genannten Nachteilen resultierenden wirtschaftlichen Effekte sind nicht zu unterschätzen, sind allerdings nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Das in dieser Untersuchung beschriebene Verfahren würde den Sollfahrplan unter Vorbehalt stellen, denn je nach Wetterlage würden sich unterschiedliche Fahrzeiten und Trassenverfügbarkeiten für den Güterverkehr ergeben. Weil Fahrpläne lange im Voraus geplant und festgelegt werden, wäre zu untersuchen, ob der Bahnbetrieb auf kurzfristig wechselnde Wetterbedingungen überhaupt reagieren könnte und welche Auswirkungen auf den Betriebsablauf und die Zuverlässigkeit des Betriebs damit einhergingen. Mehrere Änderungen von Höchstgeschwindigkeiten innerhalb eines Tages belasten den Bahnbetrieb vermutlich stärker als z.B. Anpassungen zwischen Tag und Nacht, wie sie u.a. bei Sperrpausen aufgrund von nächtlichen Bauarbeiten vorkommen. Um trotz der Eingriffe in den Betrieb eine hohe Fahrplanstabilität zu gewährleisten, wäre ein erhöhter „Bauzuschlag“ im Fahrplan für alle Güterzüge prinzipiell denkbar. Es ist jedoch zu erwarten, dass dies letztendlich zu denselben Trassenverlusten führen wird. Dies ist Gegenstand weiterer Betrachtungen.

Zwar würde die Geschwindigkeitsreduktion von Güterzügen dazu beitragen, die Belastung von Anwohnern entlang von Bahnstrecken durch Schienenlärm zu mindern. Die Maßnahme lässt sich jedoch nicht ohne weiteres mit dem politisch formulierten Ziel vereinbaren, mehr Güter-, aber auch Personenverkehr auf die Schiene zu verlagern (Stichwort Deutschland-Takt).

Die oben aufgestellten Vermutungen und Thesen sollten in weiteren Untersuchungen näher betrachtet werden, insbesondere vor dem Hintergrund einer gleichzeitigen und netzweiten Anwendung des beschriebenen Verfahrens. Dies betrifft neben der kombinierten Netzkapazität nicht zuletzt auch den kumulierten Einfluss des zusätzlichen Abbremsens und Beschleunigens auf den Energiebedarf der Güterzüge. Zudem sind die oben angesprochenen wirtschaftlichen Fragestellungen wie z.B. eine längere Transportzeit in diesem Kontext von besonderem Interesse.

Quellen

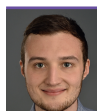
- [1] Eisenbahn-Bundesamt: Lärm-Monitoring, Schallmessungen im Schienenverkehr, <https://www.laerm-monitoring.de/>, 23.06.2020 um 14:30
- [2] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz: Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV), S. 17, https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_16/, 23.06.2020 um 14:30
- [3] Hemsworth, B.: Environmental Noise Directive, Development of Action Plans for Railways, UIC, April 2008, p. 21, https://uic.org/IMG/pdf/action_planning_paper_final-2.pdf, 23.06.2020 um 14:30
- [4] Lackhove, C.; Mönsters, M.; Linder, T.: Untersuchung betrieblicher Ansätze zur Minderung von Schienenverkehrslärm, in: EI – DER EISENBAHNINGENIEUR, Verlag Eurailpress, DVV Media Group GmbH, Hamburg, Heft 11/2013, S. 16-19

- [5] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Lärmsanierung an bestehenden Schienenwegen der Eisenbahnen des Bundes – überarbeitete Fassung 2018 –, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/foerderrichtlinie-laermsanierung-schiene.pdf?__blob=publicationFile, 23.06.2020 um 14:30
- [6] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Maßnahmen zur Lärmsanierung als Baustein der Lärminderung an bestehenden Schienenwegen der Eisenbahnen des Bundes, Gesamtkonzept der Lärmsanierung, Stand Januar 2019, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/laermvorsorge-und-laermsanierung.html>, 23.06.2020 um 14:30
- [7] Geßner, R.: Schienenverkehrslärm – Senkung der Rad/Schiene-Geräusche, in: El – DER EISENBAHNINGENIEUR, Verlag Eurailpress, DVV Media Group GmbH, Hamburg, Heft 06/2002, S. 23-25
- [8] Wiemers, M.: Auf dem Weg zum Flüsterzug, in: Güterbahnen, Alba Fachverlag, Düsseldorf, Heft 01/2005, S. 12-15
- [9] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinie des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zur Förderung von Maßnahmen der Lärminderung an Bestandsgüterwagen im Rahmen der Einführung eines lärmabhängigen Trassenpreissystems auf Schienenwegen der Eisenbahninfrastrukturunternehmen des Bundes, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/foerderrichtlinie-trassenpreissystem-latsp.pdf?__blob=publicationFile, 23.06.2020 um 14:30
- [10] Eisenbahn-Bundesamt: Thema: Lärmschutz, Lärminderung an Bestandsgüterwagen, https://www.eba.bund.de/DE/Themen/Finanzierung/Laermminderung_Bestandsgueterwagen/laermminderung_bestandsgueterwagen_node.html, 23.06.2020 um 14:30
- [11] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz: Gesetz zum Verbot des Betriebs lauter Güterwagen (Schienenlärmschutzgesetz – SchlärmschG), Schienenlärmschutzgesetz vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2804), https://www.gesetze-im-internet.de/schl_rmschg/Schl%C3%A4rmschG.pdf, 23.06.2020 um 14:30
- [12] Strigari, F.; Chudalla, M.; Biermann-Höller, S.; Wagner, P.; Ziegert, M.: Lärmwetter – Wie stark beeinflusst das Wetter die Schallausbreitung?, Verkehr und Infrastruktur 2018, 1. Tagung des BMVI-Expertennetzwerks, 14. Juni 2018, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Berlin, https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Termine/2018/Daten-VIT/Vortrag-Strigari.pdf?__blob=publicationFile&v=2, 24.06.2020 um 10:00
- [13] Heimann, D.; Ehrenfried, K.; Elmenhorst, E.; Henning, A.; Maaß, H.; Müller, U.; Penning, S.; Schady, A.: Von der Emission bis zur Wirkung, Betrachtung eines Lärmbrennpunkts, Lärmbekämpfung, Bd. 9 (2014), Ausgabe Nr. 1 – Januar, https://elib.dlr.de/87756/1/Heimann_et_al_L%C3%A4rmbek%C3%A4mpfung_2014.pdf, 24.06.2020 um 10:00
- [14] Bundesanstalt für Straßenwesen: Aufbau einer Datenbank zur Berechnung exemplarischer Lärmsituationen unter Einbeziehung von Geräuschemissionsdaten des Verkehrsträgers Straße und meteorologischer Daten (02.0416), Projektbericht in Vorbereitung, https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Projekte/fp-laufend-v3.html?nn=1819560, 24.06.2020 um 10:00
- [15] Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning; Technical Report HAR32TR-040922-DGMR20; 20 January 2005
- [16] Salomons, E.; Van Maercke, D.; Defrance, J.; de Roo, F.: The Harmonoise sound propagation model, Acta Acustica united with Acustica, 97(1): 62-74, 2011
- [17] Defrance, J.; Salomons, E.; Noordhoek, I.; Heimann, D.; Plovings, B.; Watts, G.; Jonasson, H.; Zhang, X.; Premat, E.; Schmich, I. et al.: Outdoor sound propagation reference model developed in the European Harmonoise project, Acta Acustica united with Acustica, 93(2): 213-227, 2007
- [18] Balogh, K.; Ziemann, A.; Daniel, D.: Influence of atmospheric refraction on pulse propagation over a flat ground surface, 2006, Acta Acustica 92, S. 848-852
- [19] Ziemann, A.; Balogh, K.; Arnold, K.: Modelling and measuring the atmospheric excess attenuation over flat terrain during night time conditions, 2007, Meteorol. Zeitschrift 16, S. 429-441
- [20] Ostashev, V. E.: Acoustics in moving inhomogeneous media, 1997, E & FN Spon, London, 259 S.
- [21] Salomons, E. M.: Computational atmospheric acoustics, 2001, Kluwer Academic Publishers, 355 S.
- [22] Heimann, D.; Salomons, E. M.: Testing meteorological classifications for the prediction of long-term average sound levels, 2004, Appl. Acoustics 65, S. 925-950
- [23] Van Renterghem T.; Botteldoorn D.: Meteorological influence on sound propagation between adjacent city canyons: A real-life experiment, J. Acoust. Soc. Am. 127, 2010, pp. 3335-3346
- [24] Heimann, D.: Three-dimensional linearised Euler model simulations of sound propagation in idealised urban situations with wind effects, Appl. Acoustics 68 (2007), S. 217-237
- [25] DIN ISO 9613-2, „Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien; Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren“, Ausgabe Oktober 1999

- [26] Erläuterungen zur Anlage 2 der Sechzehnten Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BlmschV); Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03) Teil 2: Testaufgaben, Stand 17. April 2015; Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/012/1801280.pdf>, 24.06.2020 um 10:00
- [27] Thiel, H.-C.: Ausgewählte Begriffe und Abkürzungen des Eisenbahn- und Verkehrswesens, der Fahrzeugtechnik und ausgewählter Rechtsgrundlagen, Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg, Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung, Lehrstuhl Eisenbahnwesen, Skript 0-2/2019/1, <https://www-docs.b-tu.de/fg-eisenbahn/public/Download/0-2BegriffeAbk.pdf>, 07.07.2020 um 14:00
- [28] Meirich, C.: Berechnung und Bewertung der Gesamtleistungsfähigkeit von Eisenbahnnetzen, Dissertation, Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Nr. 69, 2017
- [29] Heister, G.: Eisenbahnbetriebstechnologie, DB-Fachbuch, Heidelberg u. a., Eisenbahn-Fachverlag, 2006
- [30] DB Netz AG: Richtlinie 402 Trassenmanagement, in der Fassung vom 01.04.2006
- [31] Deutsche Bahn AG: Elektronisches Kursbuch, <http://kursbuch.bahn.de/hafas/kbview.exe>, 23.06.2020 um 14:30
- [32] Holzhey, M.: Schienennetz 2025 / 2030, Ausbaukonzeption für einen leistungsfähigen Schienengüterverkehr in Deutschland, Umweltbundesamt, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/schienennetz-2025-2030>, 23.06.2020 um 14:30
- [33] Eisenbahn-Bundesamt: Lärm-Kartierung, Ergebnisse der strategischen Lärmkartierung/Lärmkarten, <http://laermkartierung1.eisenbahn-bundesamt.de/mb3/app.php/application/eba>, 23.06.2020 um 14:30
- [34] DB Netz AG: Richtlinie 402 Trassenmanagement, Planungsprocedere, Trassenanmeldungen, Ril. Nr. 402.0202, in der Fassung vom 15.12.2019



Michael Mönsters, M.Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
DLR, Institut für Verkehrssystem-
technik, Braunschweig
michael.moensters@dlr.de



Jakob Geischberger, M.Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
DLR, Institut für Verkehrssystem-
technik, Braunschweig
jakob.geischberger@dlr.de



Dr. Arthur Schady
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
DLR, Institut für Physik der
Atmosphäre, Oberpfaffenhofen
arthur.schady@dlr.de



Dr. Katharina Elsen
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
DLR, Institut für Physik der
Atmosphäre, Oberpfaffenhofen
katharina.elsen@dlr.de